

УДК 519.3

М.П. Мазур, д.т.н., проф.**С.А. Крижановський, асист.***Хмельницький національний університет***РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПРОГНОЗУЮЧОГО
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ КОНТУРНОЇ ОБРОБКИ
КІНЦЕВОЮ ФРЕЗОЮ НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ТА ТОЧНОСТІ ОБРОБКИ**

В статті представлено шляхи вирішення головних задач проектування та розробки системи прогнозуючого моделювання процесу контурної обробки кінцевими фрезами.

Вступ. Головним напрямком інтенсифікації промислового виробництва є застосування у виробничих процесах сучасних новітніх технологій, комп'ютеризованих систем проектування та підготовки технологічних процесів, результатів фундаментальних та прикладних наукових досліджень. Застосування металорізальних верстатів з числовим програмним керуванням, в порівнянні із універсальним обладнанням, дозволяє суттєво підвищити ефективність металообробки. Точність та ефективність обробки деталей на верстатах з ЧПК в значній мірі залежать від якості запрограмованої керуючої інформації, трудомісткості її підготовки, ступеня врахування особливостей технологічного процесу та металорізального обладнання.

В умовах сучасного виробництва фрезерування на верстатах з ЧПК є однією з найпоширеніших операцій механічної обробки. Консервативність існуючої методики щодо призначення режимів механічної обробки полягає в тому, що не використовуються можливості верстатів з ЧПК відносно гнучкого регулювання швидкості різання та подачі різального інструменту. Підвищення ефективності операції контурного фрезерування на верстатах з ЧПК можна досягнути за рахунок раціонального використання можливостей кінцевих фрез, тобто призначення відповідних режимів, зокрема подач, для відповідних ділянок. Одним із перспективних напрямків досліджень, що дозволяє отримати розв'язок даної задачі, є проектування та розробка систем прогнозуючого моделювання процесу різання, оскільки позитивний економічний ефект від використання подібних систем в виробничих умовах досягається за рахунок застосування прогнозуючого моделювання на початкових етапах організаційно-технологічної підготовки виробництва.

В даній публікації авторами представлено шляхи вирішення головних задач проектування та розробки системи прогнозуючого моделювання процесу контурної обробки кінцевими фрезами:

- розрахунок контактних напружень температур та інтенсивності теплових джерел на передній та задній поверхнях різального зуба кінцевих фрез;
- оцінка стану силової взаємодії різального інструменту та оброблюваної заготовки;
- розрахунок об'ємного напружено-деформованого стану кінцевих фрез;
- вибір критеріїв пошуку раціональних режимів механічної обробки;
- програмна реалізація системи прогнозуючого моделювання.

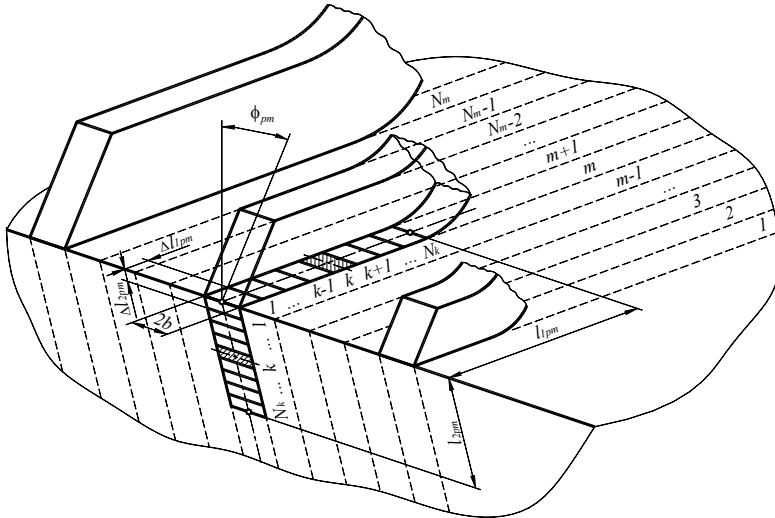


Рис. 1. Схема умовної розбивки активної довжини різального зуба кінцевої фрези на ділянки та інтервали

Виклад основного матеріалу. Одним з головних завдань систем прогнозуючого моделювання процесів механічної обробки є аналіз фізичних процесів, що мають місце в зоні різання. Для вирішення даної задачі для випадку контурної обробки кінцевими фрезами авторами запропоновано новий підхід, який полягає в поєднанні методики дискретного моделювання із термомеханічним підходом щодо процесу різання пластичних металів [4]. Моделювання багатозової обробки, коли в процесі зняття припуску одночасно приймають участь декілька різальних кромки, запропоновано здійснювати на основі розробленої авторами математичної моделі роботи одного зуба фрези. Циклічність характеру роботи окремого зуба, яка полягає в послідовному череду-

ванні робочого та холостого ходів, дозволяє обмежити математичну модель рамками одного повного оберту.

Заміна неперервного руху зуба кінцевої фрези послідовністю N_p дискретних переміщень дозволяє врахувати таку кінематично обумовлену властивість фрезерування, як зміна товщини зрізаного шару в процесі переміщення різальної кромки по дузі контакту інструмента та заготовки. Змінний характер умов різання вздовж різальної кромки зуба кінцевої фрези (рис. 1), що є наслідком конструктивних особливостей різального інструмента, а саме гвинтової форми зуба, враховано шляхом розбиття різальної кромки по ширині фрезерування на N_m ділянок контакту між стружкою, інструментом і поверхнею різання. Для врахування нерівномірності розподілу нормальних і дотичних напружень та інтенсивності теплових джерел вздовж контактної ділянки різальної кромки остання розбивається на N_k інтервалів, з наступною апроксимацією на кожному інтервалі даних величин середніми значеннями.

Як базову схему стружкоутворення прийнято спрощену схему з єдиною площиною зсуву, нахиленою під кутом ϕ до напрямку швидкості різання (рис. 2). Що стосується характеру розподілу нормальних та дотичних напружень в зоні різання, – прийнято гіпотезу про те, що характер зміни нормальних напружень в умовній площині зсуву визначається лінійною залежністю. Дотичні напруження розподілені рівномірно і визначаються межею міцності на зсув оброблюваного матеріалу з урахуванням температури та швидкості деформації. Характер розподілу нормальних напружень по передній поверхні інструмента приймаємо таким, що відповідає параболічній залежності М.М. Зорева. Дотичні напруження тертя на ділянці пластичного контакту визначаються дійсною межею міцності на розрив оброблюваного матеріалу і контактною температурою. Ділянка пружно-пластичного контакту характеризується коефіцієнтом зовнішнього тертя, який в першому наближенні змінюється за лінійним законом.

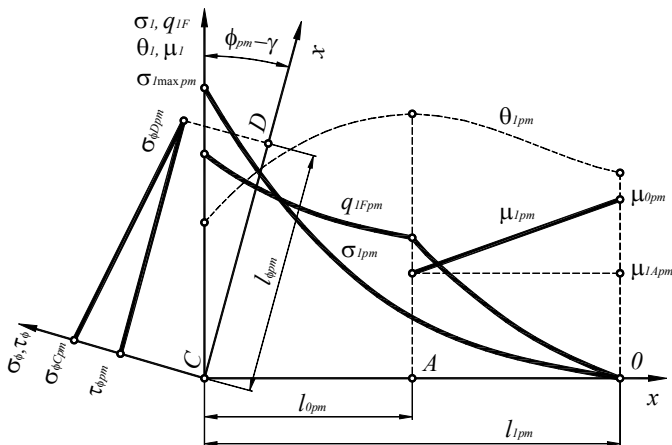


Рис. 2. Епюри напружень і температур в зоні первинних пластичних деформацій та на передній поверхні т-ї ділянки різальної кромки в момент р-го дискретного переміщення

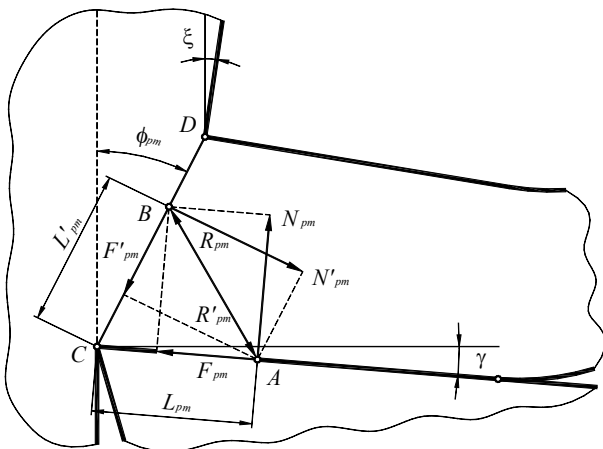


Рис. 3. Рівновага окремого елемента стружки під дією напружень в зоні первинних пластичних деформацій і на ділянці контакту стружки та передньої поверхні інструмента

Звівши шляхом інтегрування контактні напруження, що діють у площині зсуву і на передній поверхні інструмента, до результируючих нормальних (N і N') та дотичних (F і F') сил (рис. 3), отримуємо за-

мкнуту рівноважну систему. Розглянувши рівновагу окремого елемента стружки, отримуємо відповідні рівняння рівноваги, з яких можна визначити невідомі величини. Ітераційний цикл розрахунку контактних характеристик зони різання складається з послідовного визначення $\phi \rightarrow l_1 \rightarrow n \rightarrow$

$\rightarrow \sigma_m \rightarrow \mu$ для кожної i -ї ділянки різальної кромки. Задавши початкове наближення $\mu = 1$, розрахунок проводимо до отримання стабільного значення μ , що забезпечує рівновагу системи.

Методика розрахунку контактних напружень на ділянках задньої поверхні різального інструмента (рис. 4) розроблена на основі відомої методики з втискування “штампа-інструмента” в поверхню різання (операція зворотна пружному відновленню). Ґрунтуючись на принципі суперпозиції полів напружень, напружене поле від втискування “штампа-інструмента” в поверхню різання накладаємо на поле напружень від дії навантажень в умовній площині зсуву. Передумовою для побудови методики розрахунку поля напружень на ділянці контакту l_2 є завершення етапу припрацювання задньої поверхні. Необхідно також зауважити, що вибраний для рішення даної задачі математичний апарат (метод скінчених елементів) безпосередньо не дозволяє враховувати рух штампа в умовах тертя, тому для врахування даної особливості використано методику, запропоновану професором М.П. Мазуром.

Задача розрахунку температур контактних ділянок передньої та задньої поверхонь зуба кінцевої фрези вирішувалась методом джерел тепла, на основі аналізу процесів теплообміну як з боку стружки, поверхні різання, так і з боку різального інструмента [3]. Як базову для розрахунку температур контактних ділянок використано методику, запропоновану професором М.П. Мазуром. Особливість розрахунку температури контактних ділянок l_1 та l_2 , з боку зуба кінцевої фрези, полягає в тому, що на етапі поточного дискретного переміщення, крім миттєвої конфігурації теплових джерел, необхідно враховувати вплив аналогічних джерел теплоутворення із попередніх дискретних переміщень.

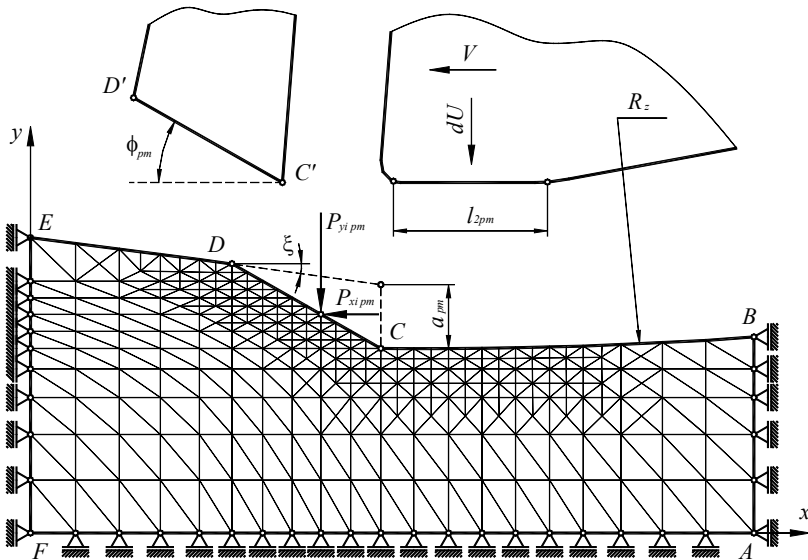


Рис. 4. Схема зовнішнього навантаження та граничних умов розрахункової скінченоелементної моделі поверхні різання

На підставі граничної умови 4-го роду, яка передбачає рівність контактних температур контактуючих тіл, системи рівнянь для розрахунку контактних температур з боку стружки, оброблюваної поверхні та з боку різального інструмента можуть бути об'єднані в загальну систему, оскільки різальний інструмент знаходиться практично в беззазорному контакті як зі стружкою, так і з поверхнею різання. Розв'язок загальної системи лінійних рівнянь дозволяє отримати закони розподілу інтенсивності теплових джерел вздовж контактних ділянок l_{1pm} , l_{2pm} та відповідно розрахувати величини контактних температур на момент завершення поточного p -го дискретного переміщення (рис. 5).

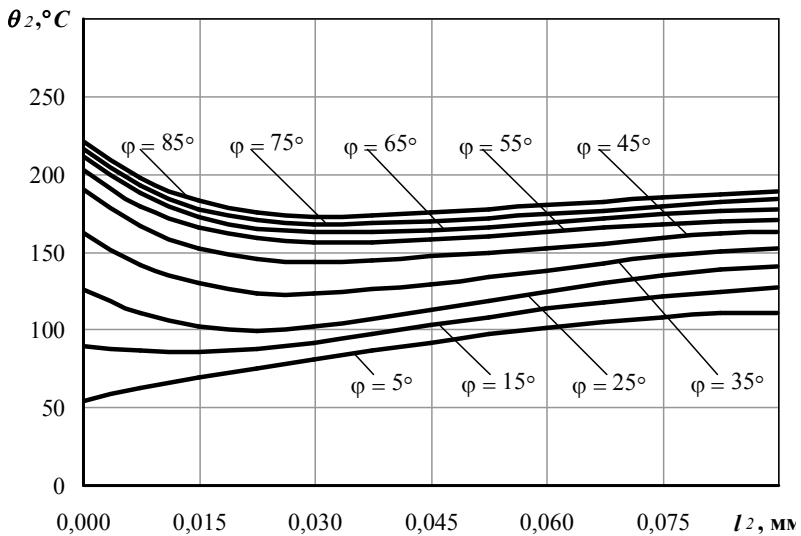
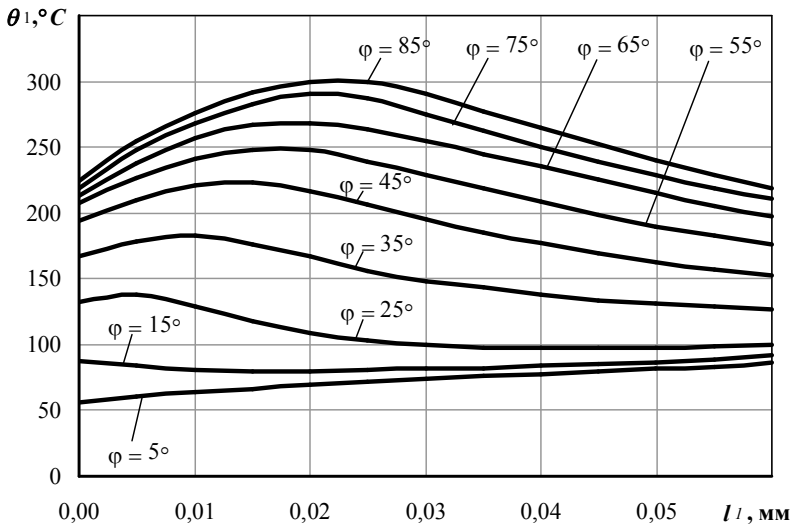


Рис. 5. Зміна миттєвих температур на передній (l_1) та задній (l_2) поверхнях різального інструмента в залежності від кута повороту φ (Р6М5–Сталь45, $\varnothing 16 \text{ мм}$, $Z = 6$, $b = 12 \text{ мм}$, $t = 8,0 \text{ мм}$, $S_z = 0,015 \text{ мм/зуб}$, $V = 0,3 \text{ м/с}$)

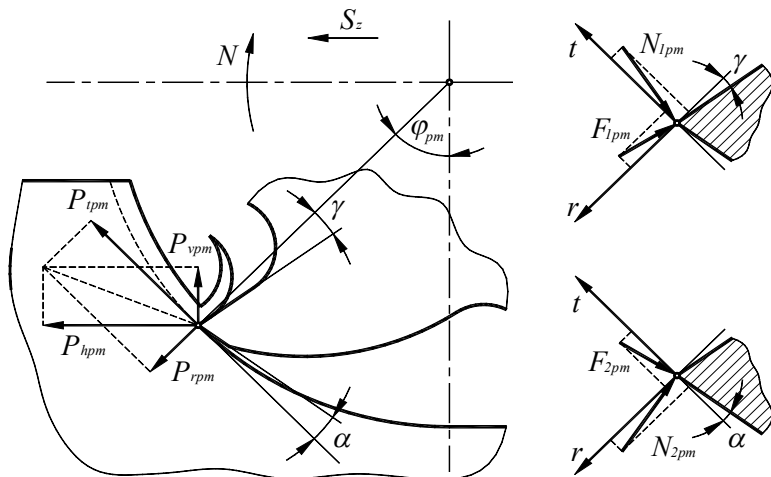


Рис. 6. Розрахункова схема визначення складових сили різання на t -й ділянці різальної кромки зуба кінцевої фрези в момент p -го дискретного переміщення

Всі розглянуті вище розрахункові модулі з визначення контактних напружень як на передній, так і на задній поверхнях різального інструменту з врахуванням методики розрахунку температур контактних ділянок, за умов нестационарного процесу різання та невстановленого режиму теплообміну, об'єднані в єдиному розрахунковому циклі, метою якого є визначення складових сили різання для кожної елементарної ділянки різальної кромки зуба кінцевої фрези.

Як вхідні дані для розробки аналітичних залежностей, здатних об'єктивно оцінити стан силової взаємодії різального інструменту та заготовки на момент p -го дискретного переміщення, використано закони розподілу нормальних σ_{Npm} та дотичних напружень тертя q_{Fpm} на передній та задній поверхнях t -ї ділянки різальної кромки зуба кінцевої фрези. Сили нормального тиску N_{1pm} і N_{2pm} та сили тертя F_{1pm} і F_{2pm} , що виникають на передній та задній поверхнях t -ї ділянки різальної кромки в наслідок процесу стружкоутворення (рис. 6), розраховуються шляхом інтегрування відповідних епюр нормальних та дотичних напружень.

Аналіз літературних джерел, пов'язаних із дослідженням напружено-деформованого стану різального інструменту в процесі виконання операції механічної обробки, вказує на переважно експериментальний характер методів вирішення даної проблеми: поляризаційно-

оптичний, голографічний, інтерферометричний методи та інші. Безумовно, необхідно відзначити велику інформативність даних методів, проте їх використання обмежено, перш за все, необхідністю застосування відповідного експериментально-дослідного обладнання. Одночасно зі швидким розвитком обчислювальної техніки широкої популярності набули числові методи, серед яких одним з перспективних напрямків вирішення даної проблеми вважається метод скінчених елементів (МСЕ). Застосування його в системі прогнозуючого моделювання процесу контурного фрезерування вимагає вирішення ряду додаткових задач, серед яких побудова розрахункових МСЕ моделей кінцевих фрез. В зв'язку з тим, що відповідність результатів розрахунку напружень та деформацій різального інструмента за методом кінцевих елементів реальному напружено-деформованого стану багато в чому залежить від достовірності відтворення його конструктивних та геометричних параметрів, втілених в розрахунковій МСЕ моделі, особлива увага приділена питанню аналітичного представлення форми гвинтових канавок [1], [2], оскільки саме вони є основою формування профілю ріжучих зубів кінцевих фрез.

На основі математичних співвідношень отримано аналітичні залежності, що дозволяють розрахувати координати відповідних опорних точок профілю канавки (рис. 7) в полярній системі координат. Гвинтовий характер зубів кінцевих фрез враховується шляхом повороту кожного наступного січення відносно попереднього на кут $d\varphi$, величина якого може бути визначена із залежності: $d\varphi = 2 \cdot (dH/D_z) \cdot \text{tg}(\omega_z)$. Два суміжних січення утворюють елементарну ділянку різальної частини фрези дискової форми. Кожна елементарна ділянка різальної частини фрези, в свою чергу, розбивається на фрагменти, кількість яких відповідає кількості зубів (рис. 8).

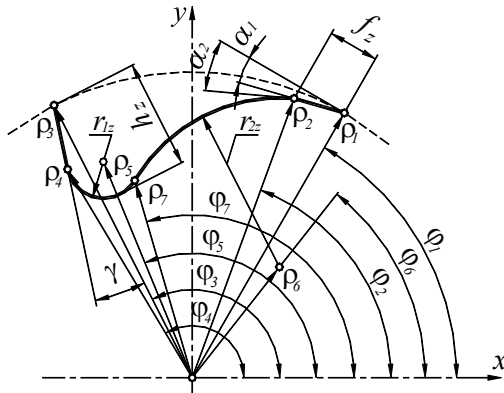


Рис. 7. Схема розташування опорних точок профілю гвинтової канавки фрези

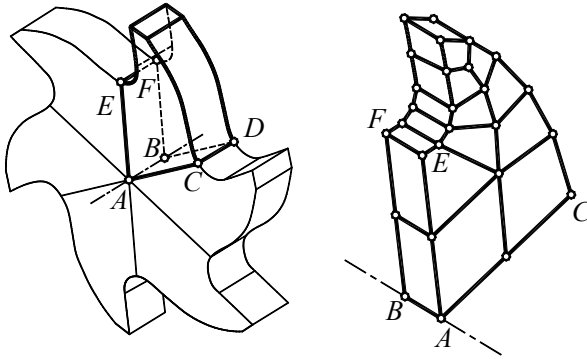


Рис. 8. Схема розбивки фрагмента елементарної ділянки різальної частини фрез на восьмикутні елементи

Принцип, покладений в основу методики побудови розрахункових кінцоелементних моделей цільних кінцевих фрез (рис. 9), може бути використаний для різальних інструментів інших форм.

Раціональну подачу різального інструменту в системі прогнозного моделювання процесу контурної обробки кінцевими фрезами [5] запропоновано здійснювати за такими критеріями:

- величина максимальних напружень на поверхні різального інструменту не повинна перевищувати допустимої межі, встановленої користувачем;

- величина максимального відхилення осі кінцевої фрези від заданої траєкторії руху в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні не повинна перевищувати допустимого значення, встановленого користувачем.

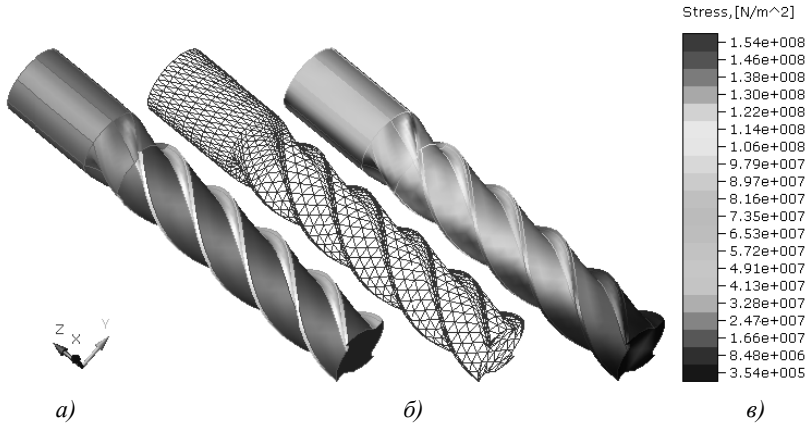


Рис. 9. Скінченоелементна модель кінцевої фрези:

а) твердотільне представлення;

б) сітка скінчених елементів; в) напружено-деформований стан

На основі сучасної методології об'єктно-орієнтованого проектування розроблено принципи побудови системи прогнозуючого моделювання процесу контурної обробки кінцевими фрезами з метою встановлення раціональних режимів обробки на верстатах з числовим програмним керуванням. Програмна реалізація системи прогнозуючого моделювання процесу контурної обробки кінцевими фрезами (рис. 10) виконана в Хмельницькому національному університеті на кафедрі технології машинобудування. Як середовище розробки програмного продукту використано Microsoft Visual Studio 6.0, мова програмування C++, середовище візуалізації реалізовано на основі *OpenGL* (*Open Graphic Library* – відкрита графічна бібліотека), що є одним із загальноновизнаних стандартів для зображення тривимірних об'єктів.

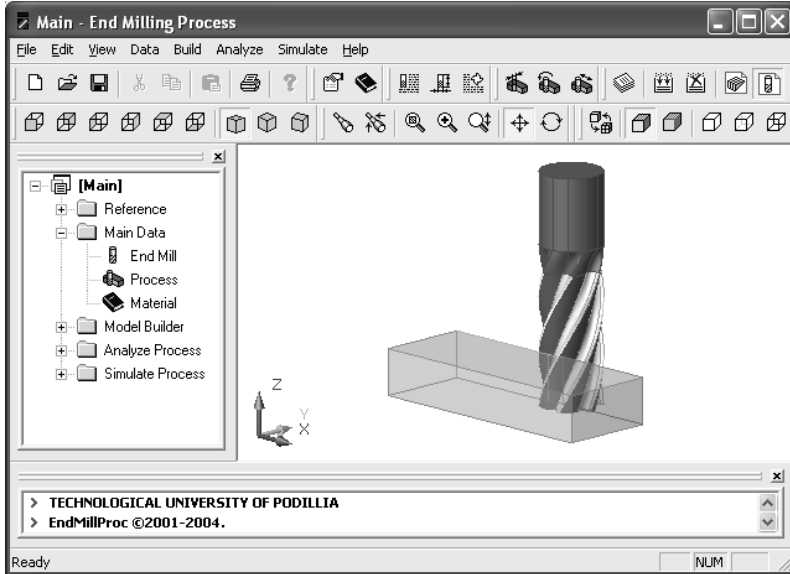


Рис. 10. Загальний вигляд інтерфейсу системи прогнозуючого моделювання процесу контурної обробки кінцевими фрезами

Висновок. Підводячи підсумок, необхідно відзначити, що результати наукових досліджень використані на етапі організаційно-технологічної підготовки виробництва в ВАТ “Мотор Січ” – Волочиський машинобудівний завод – для підвищення ефективності процесу контурного фрезерування на верстатах з ЧПК. Економічний ефект від впровадження системи прогнозуючого моделювання процесу контурної обробки склав 5000 грн.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Мазур М.П., Крижановський С.А. Визначення напружено-деформованого стану кінцевих фрез для процесу механічної обробки контуру // Вісник технологічного університету Поділля. – 2001. – № 3 / Ч. 1.
2. Мазур М.П., Крижановський С.А. Моделювання напружено-деформованого стану кінцевих фрез для процесу контурного фрезерування // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Спеціальний випуск за матеріалами II-ої міжнародної науково технічної конференції “Процеси механічної обробки, верстати та інструмент”. – 2002.

3. Мазур М.П., Крижановський С.А. Дослідження динаміки зміни температурного поля контактних поверхонь зуба кінцевих фрез в залежності від параметрів механічної обробки // Вісник національного технічного університету “ХПІ”. – 2002. – № 9 / Т. 11.

4. Мазур М.П., Крижановський С.А. Розробка прогнозуючої моделі керування точністю процесу контурного фрезерування кінцевим інструментом // Вісник Сумського державного університету. – Суми: СумДУ, 2002. – № 2 (35). – С. 61.

5. Мазур М.П., Крижановський С.А. Загальні положення системи прогнозування параметрів процесу контурної обробки кінцевою фрезою на основі моделювання процесу різання та точності обробки // Вестник Национального технического университета Украины “КПИ”. – К.: НТУУ “КПІ”, 2003. – № 44. – С. 143.

МАЗУР Микола Петрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету.

Наукові інтереси:

– обробка матеріалів.

Тел.: (03822) 72-89-44.

E-mail: mazur@dn.tup.km.ua

КРИЖАНОВСЬКИЙ Сергій Андрійович – асистент кафедри технології машинобудування Хмельницького національного університету.

Наукові інтереси:

– обробка матеріалів.

E-mail: kriganovskiy@msn.com

Подано 19.09.2005